

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

A. Tinjauan Pustaka

Agar penelitian ini dapat menghasilkan tujuan dan manfaat yang diinginkan, maka penulis melakukan studi pustaka untuk mengkaji dasar-dasar pengetahuan, standar dan teori yang berkaitan sebagai berikut:

1. Kenyamanan Termal

Menurut Peter Hoppe (2002) pendekatan kenyamanan termal ada tiga macam, yaitu: pendekatan *thermophysiological*, pendekatan *heat balance* dan pendekatan psikologis (Sugini, 2004: 6).

Menurut Karyono, (2001: 24) kenyamanan termal adalah: sensasi panas atau dingin sebagai wujud respon dari sensor perasa kulit terhadap stimuli suhu di sekitarnya. *According to Parsons (2003) it is the thermal state of the human body that determines the thermal sensation* (ThermCo, 2009: 4). *ISO 7730 stated: that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment* (Epstein and Moran, 2006: 389; Hussain and Rahman, 2009: 128) *and is assessed by subjective evaluation* (ASHRAE 55-2004: 3; Bean, 2012).

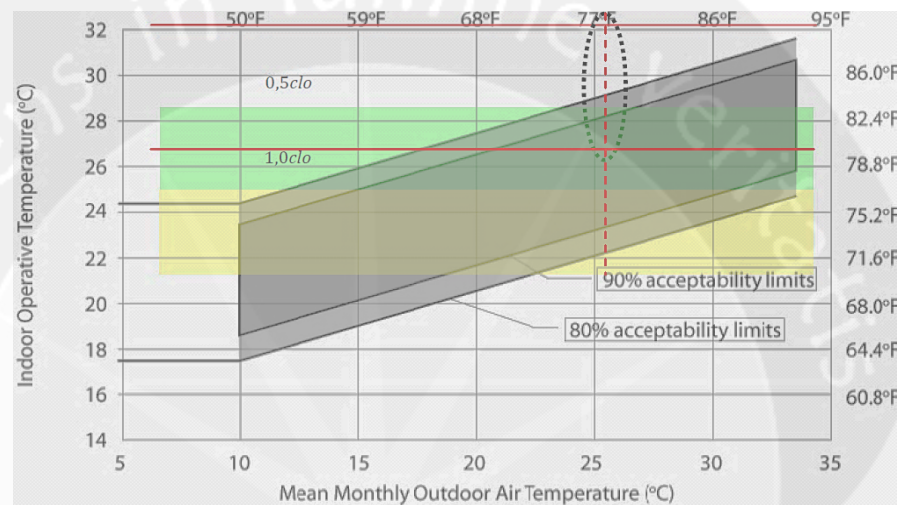
Menurut ISO 7730 (2005: 2) *Thermal (heat) balance is obtained when the internal heat production in the body is equal to the loss of heat to the environment*. Menurut Boutet, (1987) untuk kenyamanan termal faktor psikologis perlu diperhatikan sebab setiap individu berbeda persepsi pada kenyamanan tubuhnya (Purnomo, H., dan Rizal, 2000: 38).

Adaptive model menurut ASHRAE 55-2004: 2, *a model that relates indoor design temperatures or acceptable temperature ranges to outdoor meteorological or climatological parameters. The adaptive thermal comfort, for responds to the differences found between PMV/PPD assessment and actual thermal comfort response for specific type of buildings in warm climates* (Linden, et al 2008: 1). *People have a natural tendency to adapt to changing conditions in their environment* (Nicol and Humphreys, 2001: 45). *According to Baker, (1996), the predictions using conventional models has adaptive errors arising due to adaptive adjustments of occupants* (Rajasekar and Ramachandraiah, 2010: 2). *To obtain the actual mean thermal sensation vote in warm climates need a correction factor multiplied with the PMV value, maximum 1.0 for air-conditioned rooms and minimum 0.5 for non air conditioned rooms* (Linden, et al, 2008: 2). Menurut de Dear, Brager dan Cooper, 1997, penyesuaian perilaku (termasuk pakaian), adaptasi fisiologis (termasuk aklimatisasi) dan reaksi psikologis (termasuk keinginan), (Alfata, 2011: 9).

Pendekatan psikologis lebih banyak digunakan oleh para ahli dibanding dua pendekatan lainnya (Sugini, 2004: 6). Hasil penelitian (model adaptif) ini tidak bisa untuk menolak “heat balance model” (dari Fanger, 1970) yang masih digunakan sebagai dasar standar internasional kenyamanan termal, ISO 7730, (Karyono, 2001: 32).

Penelitian kenyamanan termal ruang gambar “basemen” termasuk

kategori *indoor* dengan model PMV/PPD guna memprediksi tingkat kenyamanan dengan koreksi pada standar suhu udara dalam *Comfort Calculator*. Kenyamanan termal *indoor* sebagai dampak dari pemilihan material, bentuk, orientasi, bukaan-bukaan, luasan bangunan dan lingkungan, Sastra & Marlina (2006) di dalam Maidinita (2009: 21).



Gambar 9. Keterterimaan Termal Adaptif Menurut ASHRAE 55–2004 (Alfata, 2011: 15)

2. PMV and PPD Index

Predicted mean vote (PMV) is an index that predicts the mean value of the votes of a large group of persons on the seven point thermal sensation scale (ASHRAE 55-2004: 3), based on the heat balance of the human body (ISO 7730: 2005: 2). The PMV (Predicted Mean Vote) and the PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) were developed in Fanger 1970 (Grignon-Masse, et al, 2008: 7-123).

Predicted percentage of dissatisfied (PPD) is an index that establishes a quantitative prediction of the percentage of thermally dissatisfied people determined from PMV (ASHRAE 55-2004:3).

Berikut tabel tentang tujuh skala sensasi termal dari ASHRAE, Bedford, General Comfort dan Mc Intyre dari tingkatan PMV.

Tabel 2. Skala kenyamanan termal menurut lembaga dan para ahli

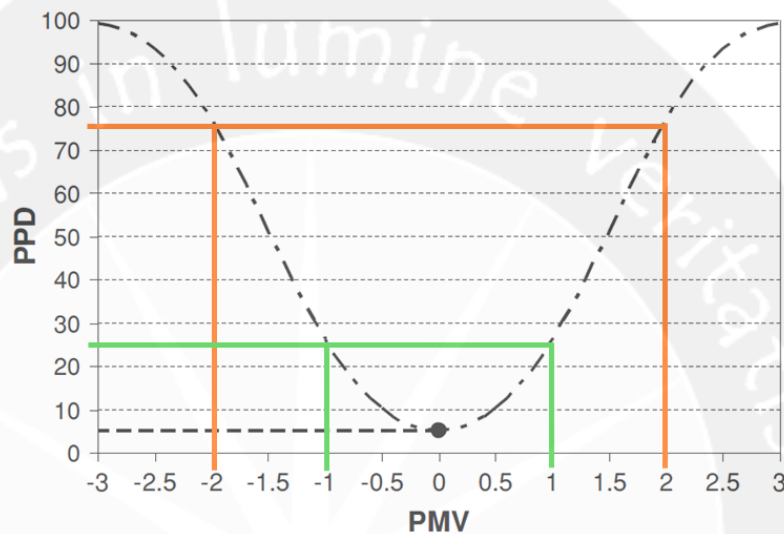
No	ASHRAE	Bedford	General Comfort	Mc Intyre
1	Hot (3)	Much too warm (7)	Very uncomfortable (3)	7
2	Warm (2)	Too warm (6)	Uncomfortable (2)	6
3	<i>slightly warm</i> (1)	<i>Comfortably warm</i> (5)	<i>Comfortably warm</i> (1)	5
4	Neutral (0)	Comfortably (4)	Comfortably (0)	4
5	<i>slightly cool</i> (-1)	<i>Comfortably cool</i> (3)	<i>Comfortably cool</i> (-1)	3
6	Cool (-2)	Too cool (2)	Uncomfortable (-2)	2
7	Cold (-3)	Much too cool (1)	Very uncomfortable (-3)	1

Sumber: Nicol & Humphreys, 2002 & Mc Intyre, 1980 (Sugini, 2004: 7; Rajasekar and Ramachandraiah, 2010: 6)

Dalam tujuh skala termal tersebut terdapat tiga kondisi kenyamanan yaitu: hangat nyaman *Comfortably Warm* (5), nyaman *Comfortably* (4) dan sejuk nyaman *Comfortably Cool* (3). Menurut Karyono, (2001: 32) tingkatan suhu nyaman daerah tropis suku Jawa yaitu: hangat nyaman pada suhu 30,2°C, nyaman (netral) pada suhu 26,7°C dan sejuk nyaman pada suhu 23,2°C (Karyono, 2001: 32). Dalam tingkat nyaman (netral) begitu juga menurut Kusumawati, (2011: 199).

Hubungan antara PMV sebagai fungsi dari PPD tertera pada Gambar 10 berikut ini. Pada grafik tersebut dapat disimpulkan secara garis besar adalah: ketika skala PMV -3 atau 3, maka 100% pengguna tidak puas; Ketika skala PMV -2 atau 2, maka sekitar 75% pengguna

tidak puas atau 25% puas; Ketika skala PMV -1 atau 1, maka sekitar 25% pengguna tidak puas atau sekitar 75% puas; Ketika skala PMV 0 (netral), maka sekitar 5% pengguna tidak puas atau 95% puas, ini realitas yang ada bahwa tidak bisa mencapai kepuasan pengguna sampai 100%.



Gambar 10. *Evolution of PPD on the basis of PMV.* (Orosa and Oliveira, 2012: 25; ASHRAE 55-2004)

Tingkat nyaman menurut Orosa dan Oliveira, (2012: 25) dibagi tiga kelas, yaitu: kelas A skala $-0,2 < PMV < 0,2$ dengan PPD (prosen perkiraan yang tidak puas) $< 6\%$; kelas B skala $-0,5 < PMV < 0,5$ dengan PPD (prosen perkiraan yang tidak puas) $< 10\%$; kelas C skala $-0,7 < PMV < 0,7$ dengan PPD (prosen perkiraan yang tidak puas) $< 15\%$.

Tabel 3. *Predicted percentage of dissatisfied based on the predicted mean vote*

Comfort Rate	PPD (%)	PMV range
A Class	< 6	$-0,2 < PMV < 0,2$
B Class	< 10	$-0,5 < PMV < 0,5$
C Class	< 15	$-0,7 < PMV < 0,7$

Sumber: Orosa and Oliveira, (2012: 25).

3. Faktor-faktor Kenyamanan Termal

Ilmu kenyamanan termal hanya membatasi kondisi udara tidak ekstrim *moderate thermal environment*, keadaan yang manusia masih bisa beradaptasi pada perubahan suhu di sekitarnya (Karyono, 2007: 5).

Kenyamanan ruang dipengaruhi: temperatur udara, kelembaban udara, radiasi matahari, kecepatan angin, tingkat terang dan distribusi cahaya pada dinding pandangan, Lippsmeier, 1994 (Maidinita, 2009: 22). Para ahli sepakat pada enam variabel kenyamanan termal, yaitu: faktor personal (pakaian dan aktivitas); faktor lingkungan: suhu udara, suhu radian, kecepatan angin dan kelembaban udara (Sugini, 2004: 4), kecuali Szokolay, Humphreys dan Nicol menambah variabel lagi.

Tabel 4. Perbandingan Faktor Penentu Kenyamanan Termal

Szokolay	Fanger, Standar Amerika (ANSI/ASHRAE 55-1992), Standar Internasional (ISO 7730:1994)	Humphreys dan Nicol
<input type="checkbox"/> Iklim: <ul style="list-style-type: none"> ▪ radiasi matahari ▪ suhu udara, ▪ kecepatan angin, ▪ kelembaban udara 	<input type="checkbox"/> Iklim: <ul style="list-style-type: none"> ▪ radiasi matahari ▪ suhu udara, ▪ kecepatan angin, ▪ kelembaban udara 	<input type="checkbox"/> Iklim: <ul style="list-style-type: none"> ▪ radiasi matahari ▪ suhu udara, ▪ kecepatan angin, ▪ kelembaban udara
<input type="checkbox"/> Faktor Individu: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pakaian ▪ Aklimatisasi ▪ Usia dan kelamin ▪ Tingkat kegemukan ▪ Tingkat kesehatan ▪ Makanan & minuman ▪ Suku bangsa 	<input type="checkbox"/> Faktor Individu: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktifitas ▪ Pakaian 	<input type="checkbox"/> Faktor Individu: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktifitas ▪ Pakaian ▪ adaptasi individu
		<input type="checkbox"/> Lokasi geografis

Sumber: Talarosha (2005: 149)

4. Suhu Nyaman Iklim Tropis

Terdapat rentang suhu, manusia tidak perlu usaha menjaga suhu tubuh sekitar 37°C yang disebut 'suhu nyaman' dan membuat produktifitas kerja optimal, Idealistina, (1991), (Karyono, 2007: 5).

Penelitian menyebutkan suhu nyaman untuk orang Jawa temperature operative (T_o) antara $23,2^{\circ}\text{C} - 30,2^{\circ}\text{C}$ atau rata-rata $26,7^{\circ}\text{C}$ (Karyono, 2001: 24, 32). Dalam standar Amerika (ASHRAE 55: 1992–2004) suhu nyaman (T_o) yaitu: $22,5^{\circ}\text{C} - 26^{\circ}\text{C}$ atau rata-rata $24,25^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian ada perbedaan sebesar $2,5^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi suhu nyaman bagi orang Indonesia penelitian (Karyono, 2001). Sebagai pembandingan suhu nyaman iklim tropis lebih tinggi adalah penelitian Zainal, 2001 di Malaysia suhu nyaman $T_o = 33^{\circ}\text{C}$ dan Khedari, 2000 di Bangkok suhu nyaman $T_o = 32,1^{\circ}\text{C}$ (Tabel dalam Lampiran 2, Daghigh, 2009: 262).

Tabel 5. Suhu netral dan batas kenyamanan termal di Indonesia.

Kelompok Suku	Suhu Netral (T_n)			Batas Nyaman (T_{cr})		
	$T_a (^{\circ}\text{C})$	$T_o (^{\circ}\text{C})$	$T_{eq} (^{\circ}\text{C})$	$T_a (^{\circ}\text{C})$	$T_o (^{\circ}\text{C})$	$T_{eq} (^{\circ}\text{C})$
1. Aceh (n=6)	24.3	24.3	23.4	20.5-27.3	20.7-27.9	20.2-26.6
2. Tapanuli (n=23)	25.9	26.2	24.6	22.5-29.2	22.9-29.4	20.2-28.9
3. Minang (n=27)	26.9	27.4	25.7	23.7-30.1	24.1-30.6	21.7-29.6
4. Sumatera yg lain (n=16)	27.0	27.3	25.9	23.7-30.3	23.9-30.7	21.8-30.1
5. Betawi (n=23)	27.0	27.3	25.9	23.7-30.3	23.9-30.7	21.8-30.1
6. Sunda (n=86)	26.4	26.6	25.0	23.9-28.9	23.9-29.3	21.8-28.3
7. Jawa (n=232)	26.4	26.7	25.2	22.8-29.9	23.2-30.2	21.0-29.4
8. Indonesia yang lain (n=62)	26.9	27.4	26.2	22.6-31.2	22.5-32.2	21.3-31.1

Sumber: Karyono, (2001: 32)

Hasil pengukuran Kusumawati, (2011: 202) suhu udara ruang bangunan $22,7^{\circ}\text{C} - 27,3^{\circ}\text{C}$, suhu globe $23,5^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$, ternyata suhu globe lebih tinggi $0,7^{\circ}\text{C} - 0,8^{\circ}\text{C}$, daripada suhu udara.

Tabel 6. Standar Suhu Nyaman dari Tata Cara Perencanaan Teknis
Konservasi Energi pada Bangunan Gedung

No	Kondisi Nyaman	Temperatur Efektif (TE)	Kelembaban (RH)
1	Sejuk Nyaman	20,5 ⁰ C – 22,8 ⁰ C	50%
	Ambang atas	24 ⁰ C	80%
2	Nyaman Optimal	22,8 ⁰ C – 25,8 ⁰ C	70%
	Ambang atas	28 ⁰ C	
3	Hangat Nyaman	25,8 ⁰ C – 27,1 ⁰ C	60%
	Ambang atas	31 ⁰ C	

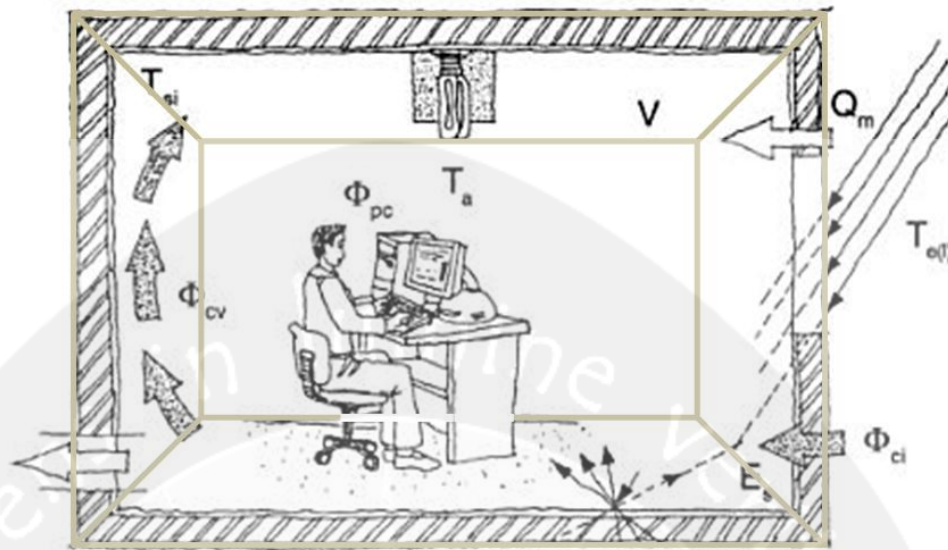
Sumber: Talarosha, (2005: 150)

5. Termal Dalam Ruang

“The definition of acceptable indoor climates in buildings is important not only for comfortability, but also in deciding its energy consumption and ensuring its sustainability” (Nicol and Humphreys, 2001: 45).

Kenyamanan tidak dapat diperoleh dengan mudah karena kondisi lingkungan dengan kenyamanan tubuh manusia tidak selalu kompatibel (Purnomo dan Rizal, 2000: 36). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kenyamanan termal di dalam ruang seperti: radiasi gelombang panjang, konveksi permukaan dinding dan udara, konveksi pengguna dan peralatan, konveksi melalui dinding, perpindahan kalor dari suhu luar, suhu permukaan bidang dinding. Kenyamanan minimal yang harus dipenuhi ruangan adalah kenyamanan termal secara fisiologis, karena sangat berperan pada kinerja pengguna bangunan (Sugini, 2004: 4).

Gambar berikut menunjukkan faktor-faktor yang mempengaruhi kenyamanan termal dalam ruang fisik.



Gambar 11. Faktor kenyamanan ruang, Heinz Frick, (Hendarto, 2010: 4)

Keterangan:

E_s radiasi gelombang panjang	Q_m perpindahan kalor suhu luar $T_{e(l)}$
Φ_{cv} konveksi muka ruang & udara	V volume (isi ruang)
Φ_{pc} konveksi tubuh & alat	T_a suhu dalam ruang
Φ_{ci} konveksi melalui ruang	T_{si} suhu muka bidang batas ruang

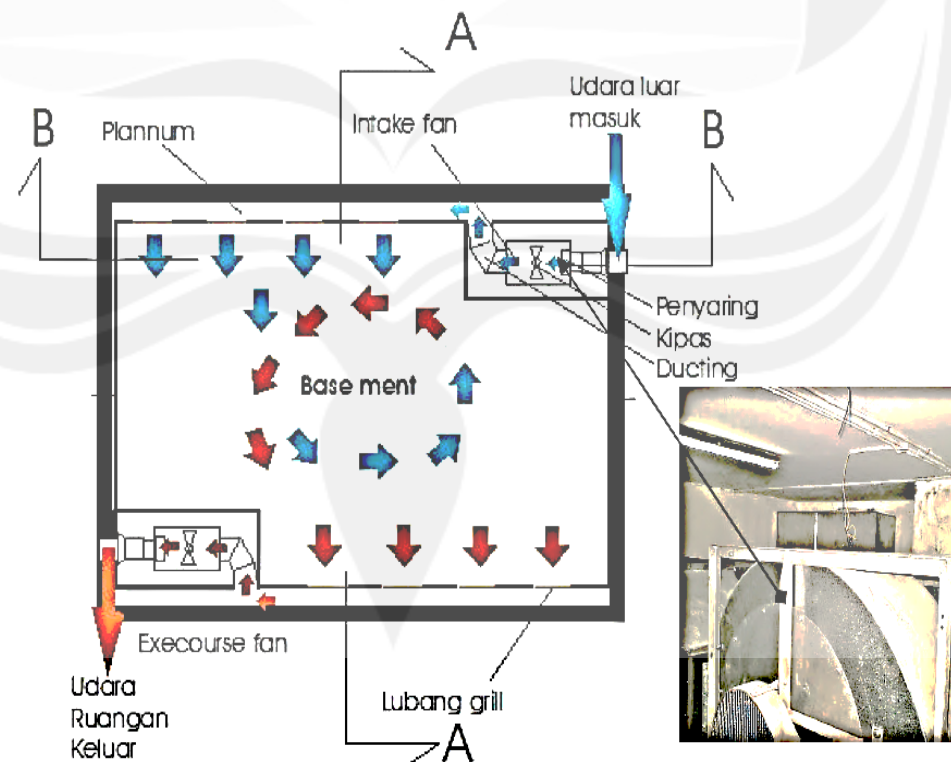
6. Ventilasi Ruang Bangunan

Menurut SNI 03-6572-2001: 3, tujuan ventilasi untuk: membuang gas-gas keringat dan CO_2 dari pernafasan; membuang uap air; membuang kalor; memperoleh kenyamanan termal. Model ventilasi ada dua macam gaya angin dan gaya termal. Ventilasi gaya angin ventilasi yang memanfaatkan perbedaan tekanan angin. Laju angin ventilasi gaya angin dipengaruhi: kecepatan rata-rata; arah angin yang kuat; variasi kecepatan, arah angin musiman dan harian; hambatan setempat, seperti padatnya bangunan, bukit, pohon dan semak belukar (SNI 03-6572-2001: 5).

Ventilasi gaya termal memanfaatkan perbedaan suhu yang terjadi pada udara dalam ruang. Udara yang telah digunakan dan telah menyerap radiasi dalam ruang naik ke bagian atas ruang dan menerobos ventilasi dekat langit-langit. Akibat udara panas naik akan terjadi tekanan minimum di bagian bawah ruang dan menghisap udara segar dari luar melalui lubang ventilasi yang lebih dekat lantai.

7. Ventilasi Mekanis

Menurut SNI 03-6572-2001: 8, persyaratan teknis ventilasi mekanis yaitu: harus dipasang jika ventilasi alami tidak memenuhi syarat; posisi fan harus membuat udara kotor keluar dan udara bersih masuk; ventilasi mekanis bekerja selama ruang dihuni.



Gambar 12. Contoh ventilasi mekanis “basemen” (Susanta, 2010: 120).

8. Pergantian Udara

Penggunaan angin pada bangunan dibagi tiga fungsi, yaitu: kesehatan, kenyamanan dan pendinginan ruang, menurut Manley, 2009; Kusoy, 1988; Kusoy dan Sangkertadi, 1998, dalam John, (2011: 69). Banyak penelitian menyimpulkan bahwa ruang kerja yang berudara segar efisiensi dan kinerja karyawan meningkat serta mengurangi kesalahan, Arismunandar dan Saito, 1981, dalam Susanta, (2010: 113).

Energi yang dihasilkan dalam metabolisme pada tubuh manusia membutuhkan O_2 yang terdapat dalam udara. Seiring waktu O_2 yang digunakan berkurang berganti CO_2 sehingga dibutuhkan pergantian udara baru yang segar. Ukuran pergantian udara dalam ruang dinyatakan dalam berapa kali volume ruangan per jam. Pergantian udara dalam ruang kelas menurut Tabel 4.4.1 SNI 03-6572-2001: 8, delapan kali volume ruang per jam atau Tabel 4.4.2 pasokan udara minimal $0,15 \text{ m}^3/\text{menit/orang}$.

9. Kecepatan Angin

Definisi umum mengatakan bahwa angin adalah udara yang bergerak, menurut Szokolay, 1980; Kinsey, 1983, (John, 2011: 69). *Air velocity is related to sensible heat released by convection and latent heat released by evaporation and, hence, the feeling of thermal comfort is influenced by draft* (Orosa and Oliveira, 2012: 18).

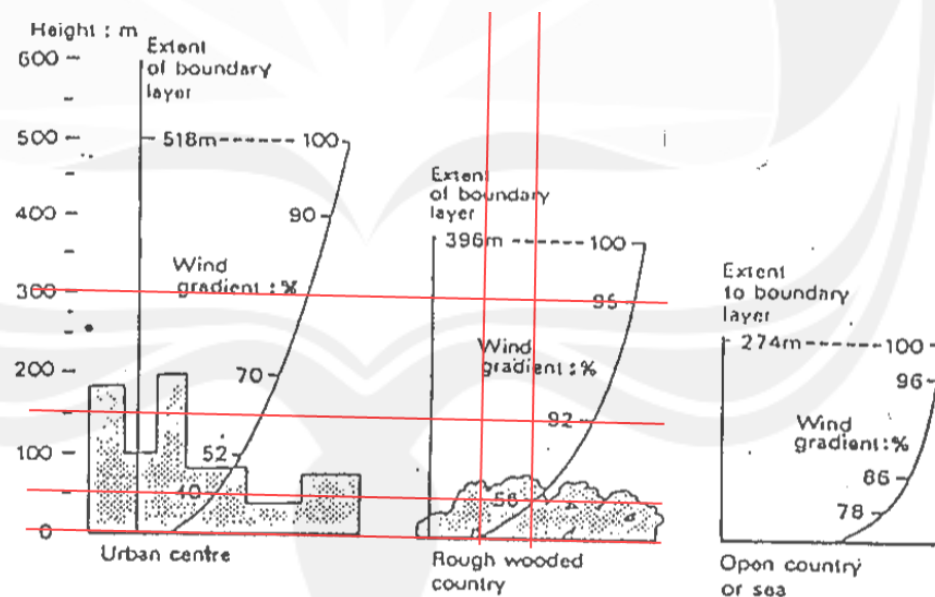
Jadi aliran angin berfungsi untuk mendinginkan suhu suatu area yang terkena hembusannya. Tabel berikut ini menyebutkan pengaruh kecepatan aliran udara terhadap kenyamanan bagi tubuh manusia.

Tabel 7. Pengaruh kenyamanan kecepatan aliran udara bagi manusia

Kecepatan angin bergerak	Pengaruh atas kenyamanan	efek penyegaran (pada suhu 30°C)
< 0.25 m/detik	tidak dapat dirasakan	0°C
0.25–0.5 m/detik	paling nyaman	0.5–0.7°C
0.5–1 m/detik	masih nyaman, tetapi gerakan udara dapat dirasakan	1.0–1.2°C
1–1.5 m/detik	kecepatan maksimal	1.7–2.2°C
1.5–2 m/detik	kurang nyaman, berangin	2.0–3.3°C
>2 m/detik	kesehatan penghuni terpengaruh oleh kecepatan angin yang tinggi	2.3–4.2°C

Sumber : Ilmu Fisika Bangunan, Heinz Frick (Hendarto, 2010: 4)

Hembusan angin di muka bumi, sampai titik ketinggian tertentu berbeda kecepatannya, begitu juga pada kondisi permukaan berbeda. Diagram berikut kecepatan angin pada tiga kondisi muka tanah berbeda.



Gambar 13. Diagram angin menurut Szokolay, 1980 (Juhana, 2000: 55).

Berdasarkan grafik di atas, kondisi situasi di kawasan SMK Negeri 2 Wonosari lebih mendekati diagram tengah, yakni: rough wooded country. Hal ini berdasarkan pertimbangan karena masih banyak

pepohonan yang tingginya melebihi bangunan dan belum ada tinggi bangunan yang mencapai 15 m atau lebih.

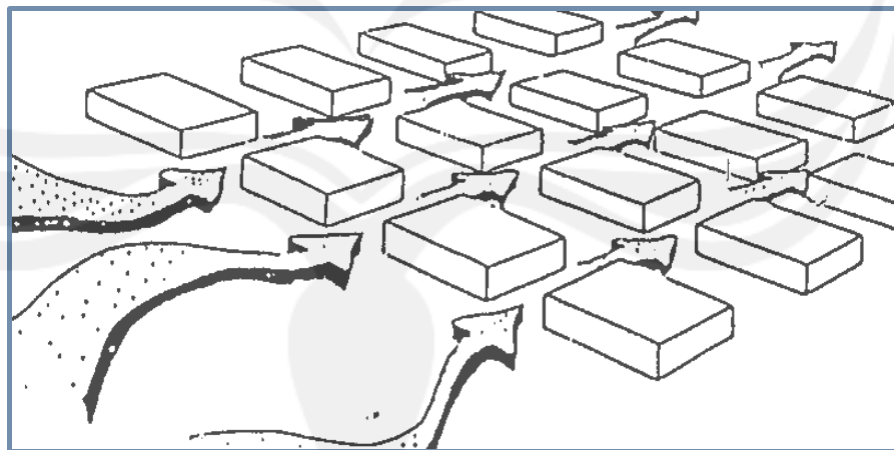
Dalam diagram *rough wooded country* pada Gambar 13, dapat diuraikan posisi ketinggian dan kecepatan anginnya sebagai berikut:

Tabel 8. Hasil pembacaan diagram rough wooded country.

No	Ketinggian (m)	Kecepatan Angin (%)
1	396	100
2	300	95
3	150	92
4	50	56
5	0	28

Sumber: Diagram angin, Szokolay, 1980 (Juhana, 2000: 55).

Penataan bangunan juga berpengaruh terhadap kelancaran aliran angin yang berhembus di sela-sela bangunan. Berikut contoh penataan bangunan yang dapat melancarkan aliran angin di sela-sela bangunan.



Gambar 14. Penataan bangunan yang mengacu gerakan angin, Golany, 1995 (Juhana, 2000: 58).

Berikut adalah tabel arah dan kecepatan angin di Yogyakarta menurut Dinas Perhubungan DIY, 2010. Bila dicermati secara mendalam dalam tabel tersebut angin yang sering terjadi ke arah 120° dari arah

utara, yaitu pada bulan Juni, Juli, Agustus dan Oktober. Pada bulan Pebruari, Maret dan Mei arah angin 60° dari arah utara dan pada bulan April, Nopember dan Desember arah angin 210° dari arah utara. Kecepatan udara (diam) = 0 m/dt terjadi setiap bulan, kecepatan maksimum terendah terjadi pada bulan Juni, Oktober, Nopember dan Desember sebesar 9 m/dt, kecepatan maksimum tertinggi terjadi bulan Januari sebesar 24 m/dt dan kecepatan maksimum sedang antara 12–14 m/dt terjadi pada bulan Pebruari, April, Mei, Juli, Agustus, September.

Tabel 9. Arah dan kecepatan angin di Yogyakarta dalam satu tahun

Bulan	Arah Angin ($^{\circ}$)	Kecepatan Angin (m/dt)		
		Min	Max	Rata-rata
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1. Januari	240	0	24	5
2. Pebruari	60	0	13	4
3. Maret	60	0	20	4
4. April	210	0	13	4
5. Mei	60	0	14	4
6. Juni	120	0	9	4
7. Juli	120	0	14	4
8. Agustus	120	0	14	4
9. September	180	0	12	4
10. Oktober	120	0	9	4
11. Nopember	210	0	9	4
12. Desember	210	0	9	4

Sumber: Dinas Perhubungan DIY 2010 (Pemkot Yogyakarta, 2011: 12)

10. Kecepatan dan Suhu Udara

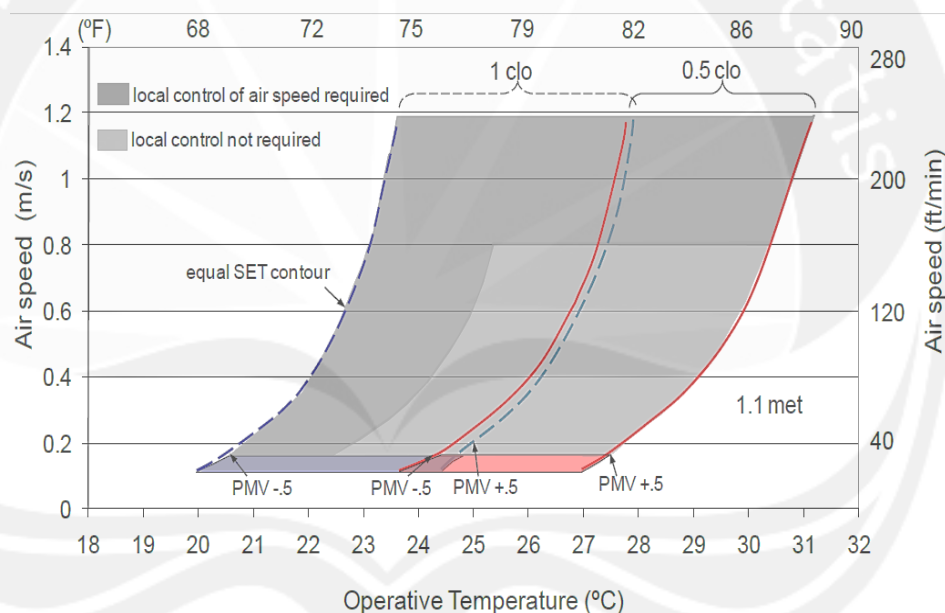
Hubungan temperatur udara bola kering (T_{db}) dengan kecepatan udara menurut SNI 03-6572 (2001: 12) adalah: jika suhu udara = 25°C maka kecepatan udara yang disyaratkan 0,1 m/dt, untuk suhu udara = $27,2^{\circ}\text{C}$ maka kecepatan udara yang disyaratkan 0,35 m/dt.

Tabel 10. Hubungan kecepatan udara dengan suhu udara kering

Kecepatan udara, m/detik.	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35
Temperatur udara kering, °C	25	26,8	26,9	27,1	27,2

Sumber: SNI 03-6572 (2001: 12)

Hubungan kecepatan udara dengan suhu operatif digambarkan dalam diagram berikut ini. Daerah diagram yang abu-abu gelap adalah kontrol kecepatan udara yang disyaratkan. Namun untuk diagram yang abu-abu terang tidak dianjurkan. Diagram ini pada skala $-0,5 < PMV < 0,5$ pada aktivitas metabolisme 1,1 met dan pada clo 1 dan 0,5.



Gambar 15. *Acceptable range of operative temperature and air speeds for the comfort zone shown in Figure 5.2.1.1, at humidity ratio 0.010. (Figure 5.2.3.2, ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: 50; Standard 55-2010; Tuner, 2011: 43)*

11. Kondisi Udara

Kondisi udara di suatu wilayah sangat ditentukan di mana posisinya pada permukaan bumi. Berikut ini tabel kondisi udara di Yogyakarta tahun 2011 menurut BMG Kelas I Yogyakarta.

Tabel 11. Kondisi udara di Yogyakarta tahun 2011

No	Uraian	Minimum	Maksimum
1	Suhu Udara (derajad)	17,5	39,8
2	Kelembaban Udara (%)	31	97
3	Tekanan Udara (mb)	986,4	1001,6
4	Kecepatan Angin (knot)	0,0	18
5	Arah Angin (derajad)	1	360
6	Curah Hujan per Hari (mm)	0,0	1,0
7	Hari Hujan per Bulan (kali)	0	29

Sumber: Geofisika Klas I Yogyakarta, 2011 (Pemda DIY, 2011).

12. Tidak Nyaman (Terlalu Panas atau Dingin)

Bekerja dalam lingkungan yang terlalu panas dan lembab, bisa menurunkan kemampuan tubuh dan menyebabkan kelelahan lebih cepat. Namun suhu ruang yang terlalu dingin berakibat membebani tubuh karena butuh kalor dari metabolisme untuk melawan sensasi dingin yang terjadi. Menurut Purnomo, suhu terlalu dingin, dapat menyebabkan hilangnya fleksibilitas alat-alat motorik tubuh disebabkan timbulnya kekakuan alat tubuh (Purnomo, dan Rizal, 2000: 36). Dampak akibat suhu yang tinggi (panas) maupun suhu yang rendah (dingin) akan diperparah oleh lamanya waktu berada di ruang kerja tersebut. Semakin lama berada ditempat yang panas makin besar efek kelelahan yang dihasilkan pada tubuh dan kerugian penurunan produktivitas kerjanya. Demikian pula memaksa tubuh bekerja pada ruang dengan keadaan suhu udara yang terlalu rendah. Purnomo juga menyebutkan, kedua kondisi ini bisa menurunkan produktivitas kerja bahkan potensial menyebabkan kecelakaan kerja (Purnomo, dan Rizal, 2000: 36). Menurut Wong (2002),

ketidaknyamanan di ruang kelas menurunkan produktivitas belajar dan (menurut Tanabe, 2003) menyebabkan kelelahan, hambatan berfikir dan sakit kepala (Rajendra, 2011: 1).

13. Radiasi

Benda bersuhu tinggi akan memancarkan panas ke udara sekitar tanpa terpengaruh gravitasi, tapi dipengaruhi interaksi pemancaran, pemantulan, penembusan dan penyerapan benda (Laksitoadi, 2008: 13).

Adapun radiasi yang terjadi dalam ruang gambar “basemen” yang berasal dari matahari diperkirakan sangat kecil, maka dalam penelitian ini diabaikan. Kemudian dari panas lampu dan tubuh pengguna dimasukkan dalam konfigurasi data pada software CFD, sehingga akan mempengaruhi hasil akhir simulasinya.

14. Panas Lampu CFL dan TL

Lampu sebagai penerangan utama ruang “basemen” akan ikut menentukan tingkat kenyamanan termalnya, sebab lampu bisa sebagai sumber panas yang melepaskan radiasi ke udara. Adapun data panas lampu tidak dilakukan pengukuran melainkan diambil dari data yang telah dipakai oleh Mahayanti (2004) yang bersumber dari Dinatron, Solo.

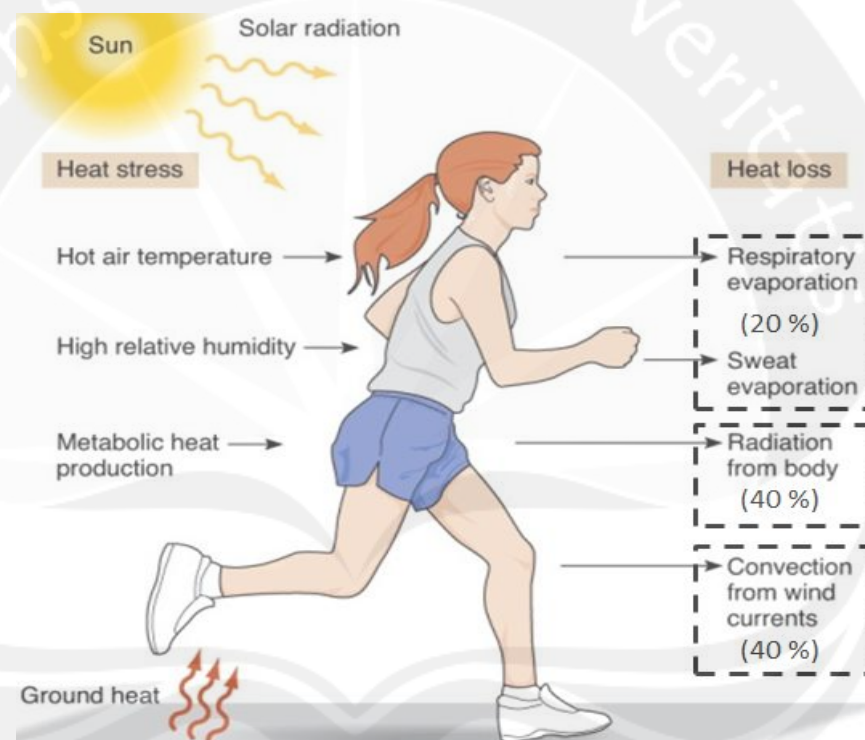
Tabel 12. Spesifikasi teknik untuk lampu neon balast elektronik

No	Keterangan	10 W	20 W	40 w
1	Tegangan kerja AC	170-240V	170-240V	170-240V
2	Frekuensi listrik	50-60 Hz	50-60 Hz	50-60 Hz
3	Disipasi panas	40°C	50°C	70°C
5	Sekering pengaman	2-3A	2-3A	3A

Sumber: Dinatron, Solo (Mahayanti, 2004: 36).

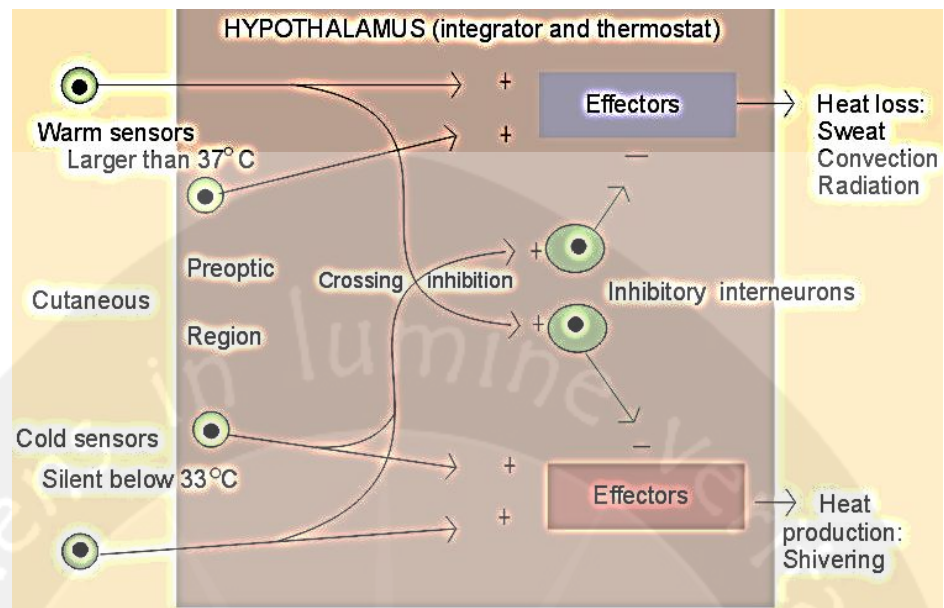
15. Panas Tubuh Manusia

Faktor yang mempengaruhi kenyamanan termal suatu ruangan di antaranya panas tubuh manusia sendiri. Panas tubuh manusia pada kulit berkisar $28.2-37.2^{\circ}\text{C}$ dan panas dalam tubuh berkisar $35.7-37.5^{\circ}\text{C}$ (<http://www.healthyheating.com>). Tubuh manusia akan melepaskan panas ketika mengalami kenaikan suhu. (Gambar 16).



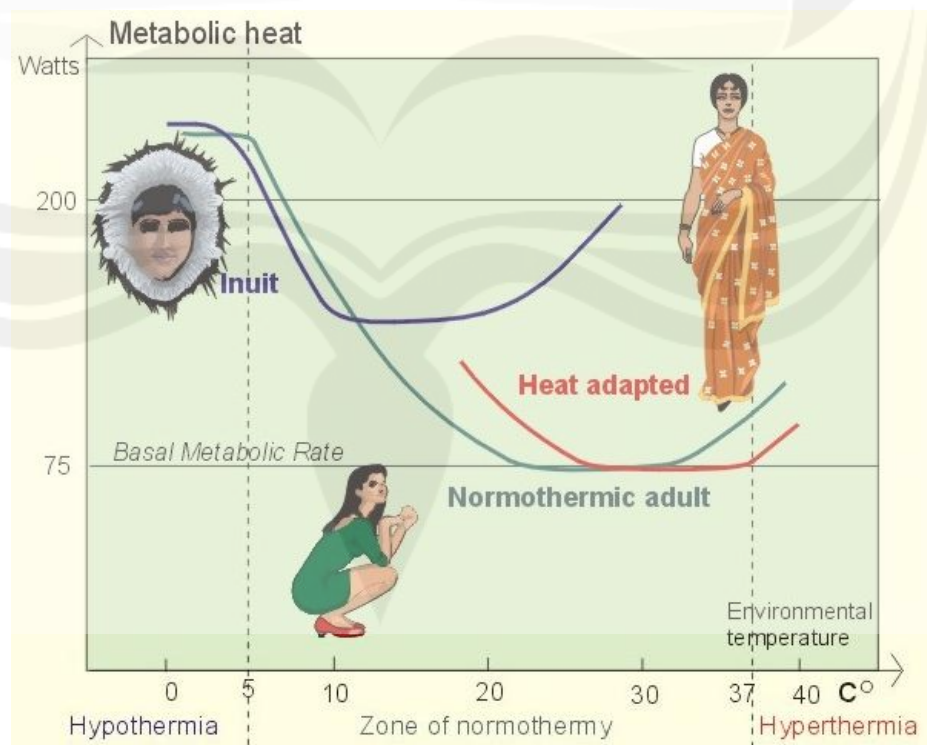
Gambar 16. Panas tubuh, menurut Egan, 1975 (Juhana, 2000: 47);
Image di <http://kristinaarquettenutrition.files.wordpress.com>
(2012).

Tubuh manusia mempunyai sensor panas dan dingin (*human thermocontrol*) yang bekerja sampai suhu dalam batas tertentu. Sensor panas (*Warm Sensors*) akan bekerja sampai suhu 37°C kemudian melepas panas, sedang sensor dingin (*Cold Sensors*) berhenti bekerja (*Silent*) di bawah suhu 33°C dan akan memproduksi panas (Gambar 17).



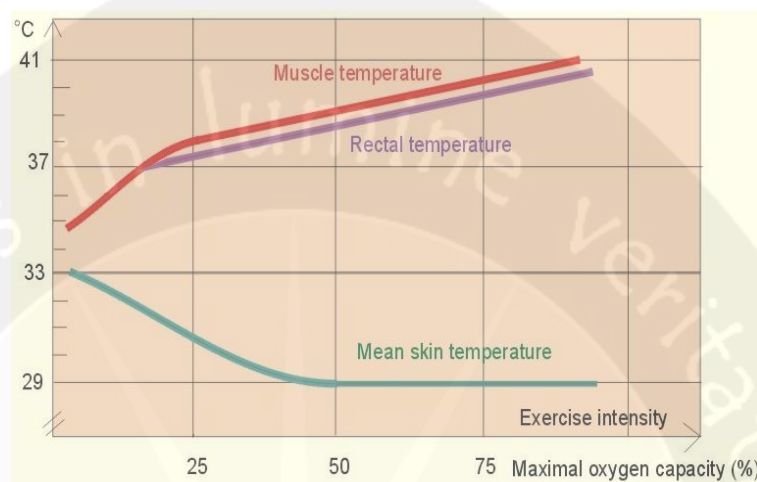
Gambar 17. *Human thermocontrol* (Calleja and Paulev, 2004: Section V; Chapter 21)

Tubuh manusia juga mempunyai kemampuan beradaptasi dengan panas dan dingin dalam batas suhu tertentu. (Gambar 18).



Gambar 18. *Heat and Cold Adaptation* (Calleja and Paulev, 2004: Section V; Chapter 21)

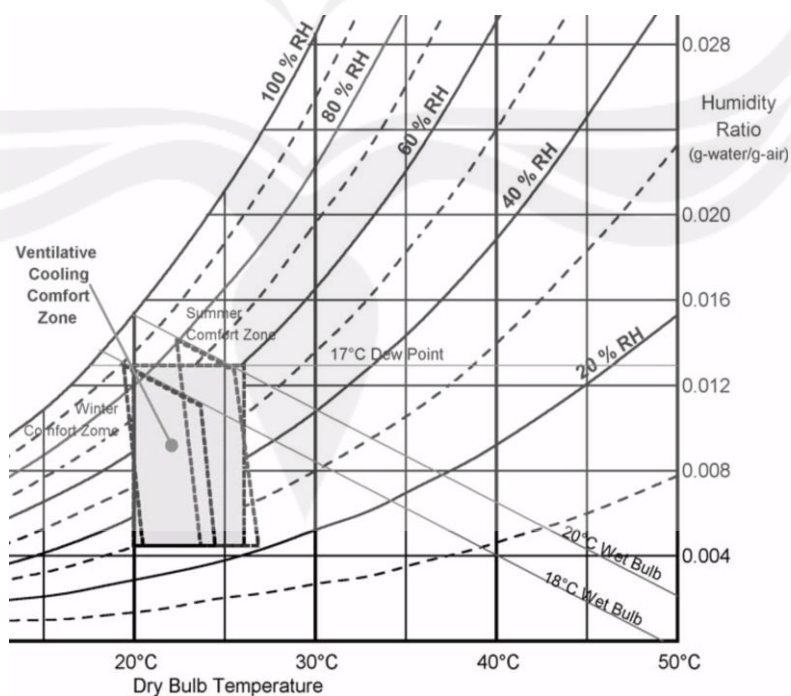
Ketika beraktivitas, suhu tubuh (otot) manusia bisa mengalami kenaikan dalam batas tertentu, sebaliknya suhu kulit mengalami penurunan dalam batas tertentu pula. (Gambar 19).



Gambar 19. *Temperature (muscle, rectal & skin) during exercise* (Calleja and Paulev, 2004: Section V; Chapter 21)

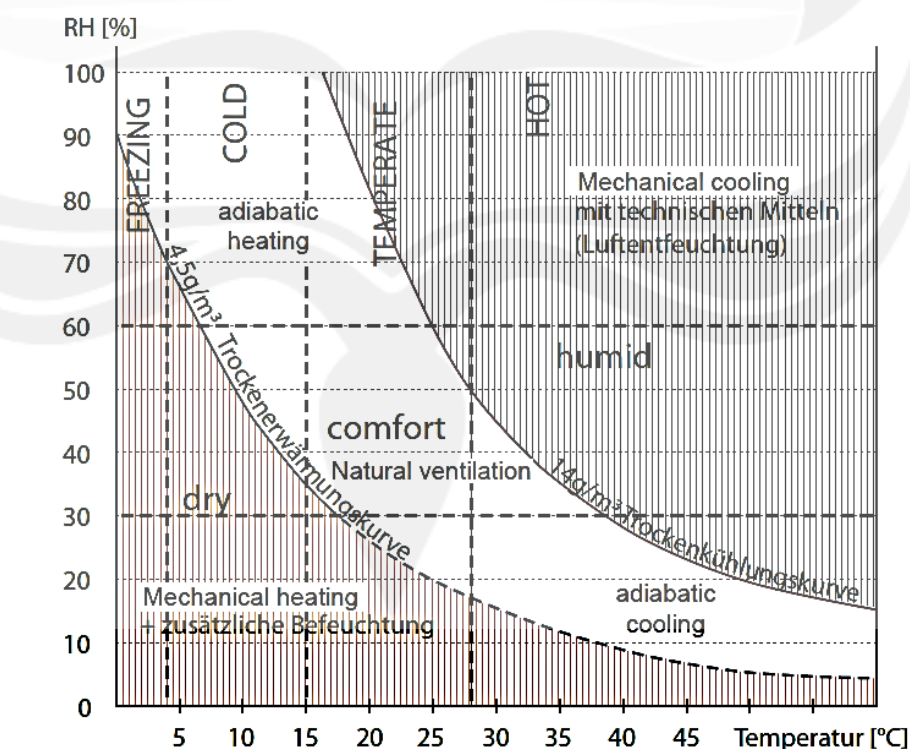
16. Kelembaban Zona Nyaman

Kelembaban udara adalah jumlah uap air dalam udara.



Gambar 20. *Ventilative cooling comfort zone* (Axley, 2001: 15).

Uap air berperan penting dalam menyerap radiasi, sehingga berpengaruh besar dalam pemanasan udara. (Laksitoadi, 2008: 9). Kelembaban udara yang tinggi mengakibatkan keringat pada tubuh manusia tidak cepat kering karena udara sudah jenuh uap air. Menurut Mangunwijaya kelembaban udara bisa dikurangi dengan panas matahari, ruang yang sulit mendapat sinar matahari, dengan hembusan udara (Laksitoadi, 2008: 10). Sebaliknya kelembaban udara yang kecil, berakibat kulit kering, bibir pecah-pecah, iritasi mata dan selaput lendir. Kelembaban udara yang nyaman bagi tubuh berkisar antara 40% - 70% (Laksitoadi, 2008: 10). Hubungan kelembaban relatif dan batas kenyamanan bagi tubuh manusia digambarkan pada diagram *Humidity and the comfort zone* berikut ini.



Gambar 21. *Comfort zone according to the temperature and relative humidity values* (Karizi, 2010: 2.1)

17. Metabolisme Aktivitas Tubuh

Nilai metabolisme aktivitas tubuh dimuat pada tabel Lampiran 6. Dalam tabel ini diambil nilai *Activity Rate* yang sesuai dengan jenis aktivitasnya bersama lima data yang lain untuk menghitung kenyamanan termal dengan software *Comfort Calculator Online*.

18. Nilai Insulasi Pakaian

Insulasi termal bahan pakaian yang dipakai dinyatakan dalam clo (clothing), yaitu : $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/Watt}$. (SNI 03-6572-2001: 14).

Untuk menghitung seluruh Clo dari pakaian yang dipakai, dipakai rumus (SNI 03-6572-2001: 15) :

$$\text{Clo (Pria)} = 0,727 \cdot \Sigma (\text{masing-masing clo}) + 0,113$$

$$\text{Clo (wanita)} = 0,770 \cdot \Sigma (\text{masing-masing clo}) + 0,050$$

Standar insulasi pakaian diambil dari (SNI 03-6572-2001: 14) sebagaimana tersebut pada tabel dalam Lampiran 7.

19. Kecepatan Angin Kipas

Standar daya motor kipas gabungan volume aliran tetap maksimum $1,36 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{jam})$. Untuk volume aliran berubah, daya motor kipas gabungan maksimum $2,12 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{jam})$, SNI 03-6572 (2001: 48).

Jika sistem ventilasi alami tidak mampu menyediakan kecepatan angin dan suplay udara yang memenuhi syarat, maka salah satunya bisa dikombinasikan dengan kipas angin. Tabel berikut hasil penelitian Wijaya yang menunjukkan kecepatan angin di depan kipas angin berukuran 15” dalam berbagai jarak di depan kipas.

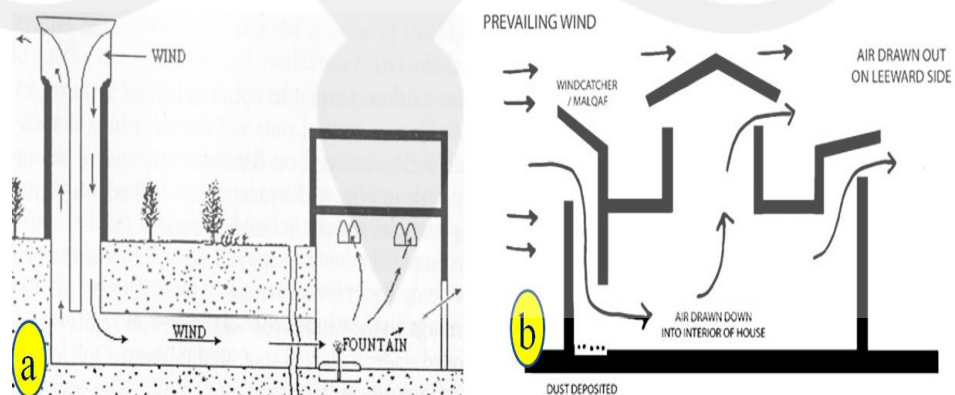
Tabel 13. Kecepatan angin kipas angin 15” dalam berbagai jarak

MEASURING POINT (cm)	AIR VELOCITY (m / sec)		AIR VELOCITY (m / min)		AIR VELOCITY (m / min)	AIR DELIVERY (m ³ / min)
	LEFT	RIGHT	LEFT	RIGHT		
2	1.8	1.7	108	102	105	0.5
6	2.1	2.1	126	126	126	1.9
10	2.4	2.4	144	144	144	3.6
14	2.2	2.1	132	126	129	4.5
18	2.1	2.0	126	120	123	5.6
22	1.7	2.0	102	120	111	6.1
26	1.5	1.9	90	114	102	6.7
30	1.5	1.8	90	108	99	7.5
34	1.4	1.7	84	102	93	7.9
38	1.1	1.3	66	78	72	6.9
42	0.7	1.1	42	66	54	5.7
46	0.5	0.6	30	36	33	3.8
50	0.0	0.4	0	24	12	1.5

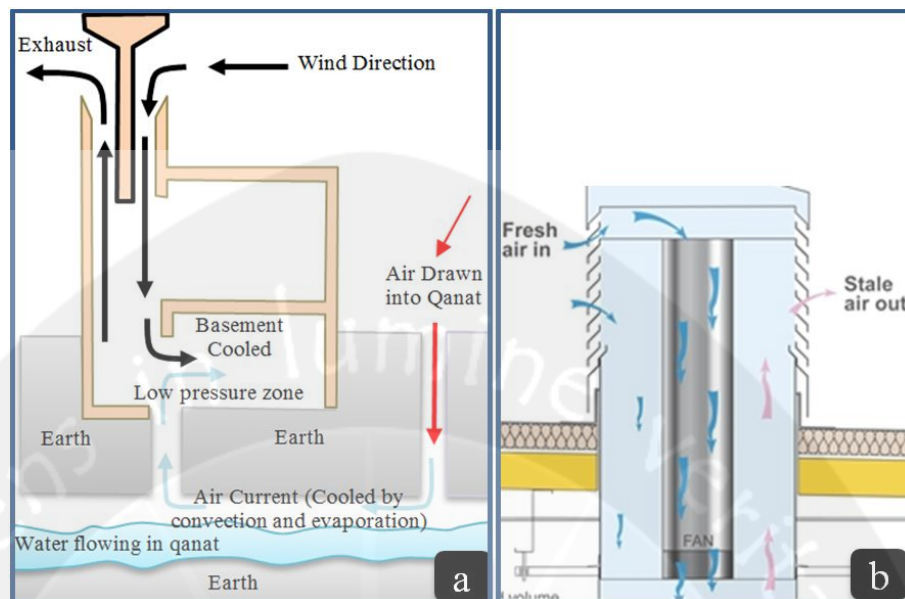
Spesifikasi kipas: Diameter blade 15 inch; Voltage 210 volt; Frekuensi 50 Hz; Arus 0,22 Ampere; Daya kipas 46,2 Watt; Suhu udara 27,9°C; kelembaban udara 79,9% (Wijaya, at al, (2005: 227)

20. Wind Catcher

Wind tower ventilasi alami yang digunakan sejak kuno, menurut Behbood, at al, (2009: 6), *Use of arched towers became popular 3000 years before the birth of Christ and is the best example of successful implementation of natural forces.* Menurut Maleki, (2011: 135), *Survey shows that over 60% of all wind towers are less than 3 meters high above the roof parapet level.*



Gambar 22. *Wind catchers and basement cooling/passive conditioning*
 ([a] Prawira, 2011: 158; Deldar and Tahsildoost, 2007: 262).
 ([b] b1competition.blogspot.com/2011).



Gambar 23. (a) *Direction of wind path and energy conservation in earth refrigerator* (Behbood, 2009: 7; Niroumand, 2010: 189; Maleki, 2011: 137). (b) *Natural ventilation system with top-down, passive stack ventilation and DC solar powered fan* (<http://www.monodraught.com/2012>).

The wind catcher systems are, at best, highly complex ventilation engines drawing pressurized air up or down the tower, through underground cool basement rooms, Nicol, 2007 (Aryan, et al, 2010: 90). The wind tower works on the principle of ventilation induced as a result of differential air pressure and temperature (Eco H., 2009: 8).

B. Landasan Teori

1. Standar Ukuran Ruang

Menurut Permendiknas No. 40, (2008: 28), ukuran minimum ruang praktik gambar teknik adalah: rasio 3 m²/peserta didik, luas 64 m², lebar 8 m, untuk ½ rombongan belajar (16 siswa). Tinggi langit-langit dari lantai minimal 2,5 m (Sujudi, 2002: 5). Setiap karyawan mendapatkan ruang udara minimal 10 m³/karyawan. (Sujudi, 2002: 11).

2. Standar Luas Ventilasi

Mengacu Sujudi, (2002: 5) ruang kerja tanpa pendingin harus berlubang ventilasi minimal 15% dari luas lantai dengan ventilasi silang.

3. Standar Kecepatan Angin

Kecepatan angin Heinz Frick (Tabel 7) dibagi tiga: paling nyaman 0,25–0,5 m/dt, nyaman 0,5–1,0 m/dt dan masih nyaman 1,0–1,5 m/dt.

4. Suhu Radian

Dalam penelitian ini diukur suhu udara dan suhu bola kering (T_{db}).

Adapun suhu globe diasumsikan penelitian Kusumawati, (2011) yaitu:

$$T_{globe} = \text{Suhu udara} + 0,3^{\circ}\text{C} \dots\dots\dots (1)$$

Suhu radian (T_{mrt}) dihitung dengan rumus Belding, (Givoni, 1963),

$$(\text{Sujatmiko, at al, 2007: 5}): T_{mrt} = T_{globe} + 0,24Va^{0,5} (T_{globe} - T_{db}) \dots\dots (2)$$

$$\text{Suhu operatif } (T_{op}) \text{ dihitung dengan: } T_{op} = AT_{db} + (1-A)T_{mrt} \dots\dots\dots (3)$$

Adapun: T_{db} = Suhu bola kering; $A = 0,5$ untuk $Va < 0,2$ m/det; $A = 0,6$ untuk $0,2 < Va < 0,6$ m/det; $A = 0,7$ untuk $0,6 < Va < 1,0$ m/det dan $A = 0,8$ untuk $1,1 < Va < 1,5$ m/det. (Sujudi, 2002: 5).

5. Suhu Nyaman

Suhu (operativ) nyaman (T_o) diambil dari penelitian Karyono, 2001 (Tabel 5) untuk kelompok suku Jawa yaitu: $23,2 - 30,2^{\circ}\text{C}$.

6. Kelembaban Udara Nyaman

Kelembaban udara yang masih dianggap nyaman di Indonesia antara 40%–70% (Laksitoadi, 2008: 10). Kelembaban nyaman ambang atas menurut Tabel 6 adalah 80%.

7. Suhu Tubuh Pengguna

Dari Gambar dalam Lampiran 9 dalam aktivitas yang dilakukan sambil duduk, suhu tubuh pengguna diasumsikan maksimum 35°C .

8. Metabolisme Aktivitas Tubuh

Nilai metabolisme aktivitas tubuh diambil dari Lampiran 6, kegiatan yang dilakukan sambil duduk nilai metabolisme (met) = 1,0.

9. Menghitung Insulasi Pakaian

Nilai insulasi termal pakaian siswa digunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Clo (Pria)} = 0,727 \cdot \Sigma(\text{masing-masing clo}) + 0,113. \dots\dots\dots (4)$$

Nilai insulasi termal pakaian siswi digunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Clo (wanita)} = 0,770 \cdot \Sigma(\text{masing-masing clo}) + 0,050 \dots\dots\dots (5)$$

Nilai insulasi masing-masing pakaian diambil dari Lampiran 7.

10. Suhu Panas Lampu CFL dan TL

Menurut Tabel 12 panas lampu CFL 10 Watt = 40°C , CFL 20 Watt = 50°C dan CFL 40 Watt = 70°C . Maka untuk CFL 11 Watt dan 38 Watt interpolasi lurus 41°C dan 68°C .

11. Kecepatan Kipas

Kecepatan kipas diambil kecepatan terendah diukur di depan kipas angin yaitu 6 m/dt menurut hasil pengukuran dengan anemometer.

12. Tingkat Nyaman

Menurut Orosa dan Oliveira, (2012: 25) dibagi tiga: kelas A range - $0,2 < \text{PMV} < 0,2$ dan $\text{PPD} < 6\%$; kelas B range $-0,5 < \text{PMV} < 0,5$ dan $\text{PPD} < 10\%$; kelas C range $-0,7 < \text{PMV} < 0,7$ dan $\text{PPD} < 15\%$.